

弱脉冲干扰试井技术及应用

刘泉海* 李青峰 刘伟 邓均健

(冀东油田分公司勘探开发处)

刘曰武

(中国科学院力学研究所)

摘要 在油井上进行产量变化、注水井上进行压力监测的弱脉冲干扰试井技术,测试工艺简单,既对油井产量影响小,又能确保得到井间可靠的地层压力传导信息。通过在冀东油田 L13 区块柳 15-17 井组的测试,分析得到了井间连通关系、连通厚度及连通层渗透率,找出了油井高含水的原因,基于这种认识所采取的油水井调整措施见到了明显效果。

主题词 弱脉冲干扰试井 技术研究 应用

前言

冀东油田地质情况复杂,油藏断层多,构造破碎,注采连通性差。为了加深对油藏开发动态的认识,2000 年冀东油田不仅开展了常规脉冲干扰试井工作,同时还积极研究和实验了弱脉冲干扰试井技术,并在柳 13 区块取得了可靠的资料和实验结果。由于冀东油区的油藏成藏条件复杂,另外受地质认识和油藏监测资料的限制,使得对油藏水驱状况和注水开发效果的分析难以得到正确结论。因此,积极探索和推广应用弱脉冲干扰试井技术,不仅能够最大限度地减少对油井生产的影响,而且可直接认识并确定油藏的注采连通状况,从而更好地指导油藏开发生产。

理论基础

弱脉冲干扰试井技术是以注水井为测试井,以生产油井为激动井,通过注水井的压力响应,分析井间储层的连通性和物性。基本的技术思路是:在注水井压力降落测试曲线上,附加激动生产油井的压力信号,通过分析注水井自身的压力变化,得到注水井周围的地质参数,并通过分析附加激动生产油井的压力信号产生的时间和压差响应的幅度,确定井间储层的连通性、连通厚度和储层物性。

与传统试井方法相比,弱脉冲干扰试井符合可

压缩流体的不稳定流动理论,可以得到地层的传导系数和存储系数;还可以描述地层的连通性、区域之间的连通关系、裂缝的几何尺寸和方向、地层的非均质性等。两者的基本原理是一样的,但又存在不同之处:①测试对象的变化。传统脉冲试井是将油井做为观察井,而弱脉冲干扰试井则是将油井作为激动井,而注水井作为观察井,甚至可以一口油井激动和多口注水井观测,这样对油田产量的影响将会大大降低。②测试工具的不同。由于油井激动的脉冲干扰信号很弱,所以弱脉冲干扰试井必须使用高精度电子压力计(存储式或地面直读式),设备的进步才使传统的脉冲试井演化为弱脉冲干扰试井。③分析方法的的不同。干扰试井用拟合法,脉冲试井使用经验法、切线法、割线法等。弱脉冲试井从载波体上取反应段,并应用压力拟合法进行分析。

1. 基本物理模型

假设地层为均质水平,流体为弱可压缩流体,由于测试时间相对较短,可以忽略温度的影响和其它物理化学变化的影响。

2. 理论计算公式

弱脉冲干扰试井压力响应:

$$p_{resp} = p_{wD1}(t_D) + \sum (-1)^m p_{wD1}(t - t_m)_D \quad (1)$$

$$p_{wD1} = K_0(r_D\sqrt{s}) / \{s[1 + C_{D1}(S_{D1} + K_0(\sqrt{s}))][1 + C_{D2}(S_{D2} + K_0(\sqrt{s}))] - C_{D1}C_{D2}(sK_0(r_D\sqrt{s}))^2\} \quad (2)$$

式中: p_{resp} ——响应压力, MPa; p_{wD} ——井底压力, MPa; t ——测试时间, h; t_m ——累加的脉冲时间, h;

* 刘泉海,男,高级工程师,目前从事油田开发技术管理工作。地址:河北省唐山市冀东油田勘探开发处,邮政编码:063200。

K_0 ——修正的贝塞尔函数; s ——拉氏变量; C ——井筒储集系数; S_{pd} ——表皮系数。

第一个正脉冲的无量纲滞后时间:

$$t_{LDk} = t_{DB} - [0.5(m-1) + R]\Delta t_{cd}$$

第一个脉冲的无量纲滞后时间:

$$t_{LD2} = t_{DC} - 0.5m\Delta t_{cd}$$

第一个正脉冲的无量纲压力响应幅值:

$$\Delta p_{D1} = p_D(t_{DB}) - p_D(t_{DA}) - \frac{(t_{DB} - t_{DA})[p_D(t_{DD}) - p_D(t_{DA})]}{(t_{DC} - t_{DA})}$$

式中: t_{DB} ——B点无量纲时间; Δt_c ——脉冲周期; Δt_{cd} ——无量纲周期长度; R ——脉冲比,即脉冲长度与整个周期长度比; m ——脉冲数(第一个正脉冲的 m 值定为1);下标A——脉冲开始点;B、C——第一奇、偶脉冲; D ——第二奇脉冲。

在弱脉冲干扰试井设计中,压力响应幅值和滞后时间的计算公式为

$$R = \Delta t_p / \Delta t_c$$

$$t_{LD} = t_L / \Delta t_c$$

$$\text{因此 } \Delta p = \frac{1.842 \times 10^{-3} q \mu B \Delta p_D (t_L / \Delta t_c)^2}{10^{-3} k h (t_L / \Delta t_c)^2}$$

$$t_L = \frac{\phi \mu C_r^2 (t_{LD} / r_D^2)}{3.6 \times 10^{-3} k}$$

$$\Delta t_c = t_L / 0.3$$

$$\Delta t_p = \Delta t_c / 3$$

式中: t_{LD} ——脉冲比 R 下达到最大无量纲压力响应幅值时的无量纲滞后时间; $\Delta p_D (t_L / \Delta t_c)^2$ ——无量纲压力响应组合幅值; t_{LD} / r_D^2 ——无量纲滞后组合时间; t_L ——滞后时间,h; Δp ——压力响应幅度; Δt_p ——脉冲长度,h。

按以上公式可进行弱脉冲干扰试井设计、施工,再附加上注水井试井的理论曲线,就可以进行弱脉冲干扰试井测试资料的解释。

应用分析

1. 柳13区块基本情况

柳13区块属冀东油区柳赞油田较早投入开发生产的主要区块之一,开采层系为下第三系沙三2+3油藏,埋深3100.0~3400.0 m,油藏类型属构造层状—岩性油藏,平均油藏厚度25 m,平均空气渗

透率 $350 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。区块于1993年投入注水开发,注采连通率约74%。目前,区块共有油井29口,开井26口,日产油228 t,综合含水40.41%,采油速度1.99%,采出程度17.72%,累积采油 $75.549 \times 10^4 \text{t}$,累积产水 $29.4476 \times 10^4 \text{m}^3$ 。注水井12口,开井8口,日注水757 m^3 ,月注采比1.5,累积注采比0.9。

柳15-17注采井组位于区块中部,其中注水井L15-17井与油井L15-18井相距约200 m,与油井L15-19井相距约300 m。L15-17井的日注入量为100 m^3 ,L15-18井日产液量20 m^3 (综合含水55%),L15-19井的日产液量为15 m^3 (综合含水80%)。柳15-17注采井组井位如图1所示。

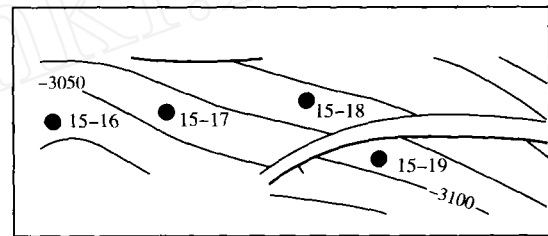


图1 柳15-17注采井组井位示意图

2. 测试参数设计及测试情况

(1) 弱脉冲干扰测试设计

① 脉冲周期及脉冲比的选择

脉冲比是关井时间与脉冲周期的比值,本设计的脉冲比为0.3,在此条件下,可以产生最大的脉冲幅值。

每开、关井一次为一个脉冲周期,本设计为不等开关时间进行。从理论计算的结果初步确定:关井时间为4 d(96 h),开井生产时间为8 d(192 h)。计算的理论脉冲试井曲线如图2所示。

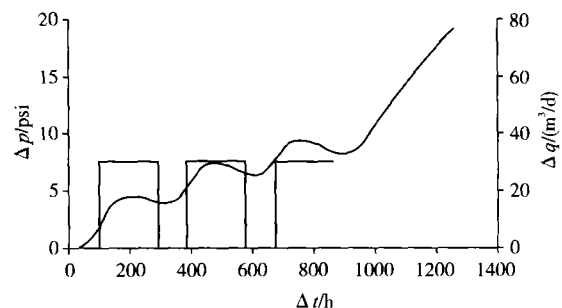


图2 脉冲时间为4d的测试模拟图

② 压力响应幅值和滞后时间的计算

脉冲比 R 为0.3,脉冲时间为4 d(96 h)时的压力响应幅值为4.2 psi、滞后时间为28 h。

将压力降落测试曲线与激动生产油井的压力脉冲信号叠加,得到实际测试曲线,通过对实际测试曲线的分析,得到所要求的井间信息和地层信息。

(2)测试情况

柳 15-17 井组弱脉冲干扰试井于 2000 年 7 月实施,施工过程见表 1。

表 1 柳 15-17 井组干扰试井施工记录

时 间	措施	累计时间 (h)	压力 (MPa)	温度 (°C)
7 月 11 日 10:39	L15-17 关井测压降	0	40.89690	80.20
7 月 21 日 09:47	L15-18 关井	239.2457	31.86263	86.47
7 月 25 日 09:47	L15-18 开井生产	335.2455	31.45774	87.19
8 月 02 日 08:02	L15-19 关井	525.4881	30.85632	88.13
8 月 07 日 08:04	L15-19 开井生产	645.5312	30.52517	88.55
8 月 14 日 10:29	结束测试	815.9479	30.18304	89.02

3. 测试结果与资料分析

(1)测试压力史图及流量史图

注水井 L15-17 井关井测压降原始数据形态曲线及油井 L15-18 井、L15-19 井开、关井产生的激动附加流量见图 3。

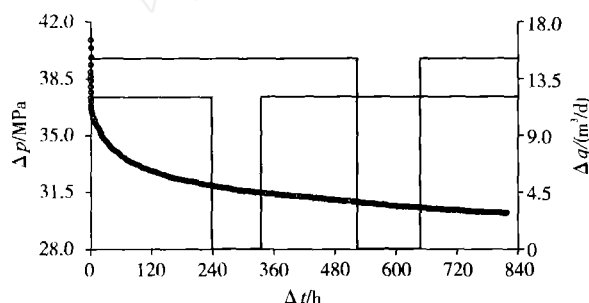


图3 整个激动测试历史直角坐标图

在实测曲线的压力展开图上,对应弱脉冲干扰试井设计出现影响脉冲时间和实际施工进度、查找邻井的响应段,以便进一步分析。

(2)测试数据分析诊断

由常规试井软件分析诊断,包括历史拟合、半对数拟合、双对数拟合,最后放大诊断分析图形上弱脉冲干扰点分别为 L15-18 井和 L15-19 井激动干扰所产生的弱脉冲“凸包”(见图 4、图 5)。各种图形分析,全部经过计算机软件处理,主要是获得最佳的拟合分析形态,以便取得最合理的地层参数及相关参数。

(3)分析结果

①L15-17 井分析结果

地层渗透率 $23.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;井周围地层由于冲刷渗透率变高,压力在向外传播的过程中渗透率

逐渐降低,趋于原始地层渗透率;由于模型限制,未能得到井筒存储系数和井底附近的污染情况。

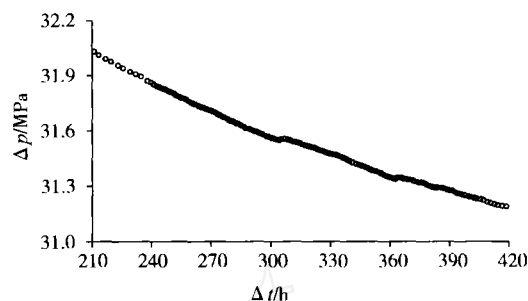


图4 L15-18井干扰压力历史直角坐标放大图

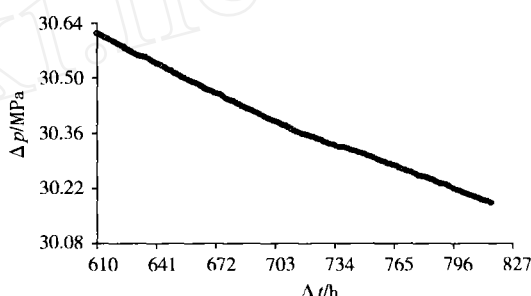


图5 L15-19井干扰压力历史直角坐标放大图

②L15-18 井分析结果

该井与 L15-17 井连通;压力响应时间 278.5 h;地层连通渗透率 $18.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,连通厚度 16.93 m。

③L15-19 井分析结果

该井与 L15-17 井是连通的,否定了过去在两井之间有一断层存在的地质认识;压力响应时间 533.5 h;地层连通渗透率 $3.186 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,连通厚度 2.364 m。此结论尚需地质上其它资料验证。

(4)柳 15-17 井组试验效果评价

根据测试结果,对 L15-17 井进行了卡封措施,卡封后 L15-18 井含水明显下降。说明两井间油层是连通的,测试结论是正确的(见图 6、图 7)。

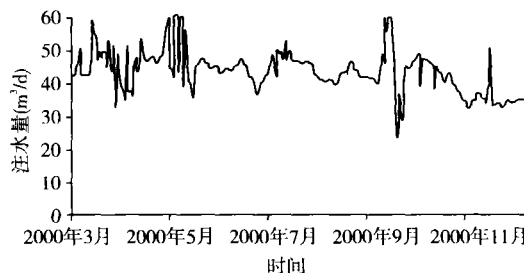


图6 L15-17井注水曲线

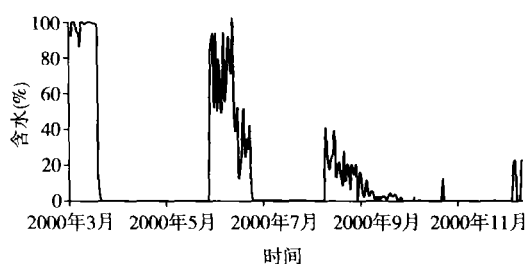


图7 L15-18井含水曲线

本次测试是成功的,既验证了弱脉冲干扰试井方法和理论的正确性,又得到了观察井和激动井的有关地质和开发动态信息。目前,柳13区块Ⅱ油组底界构造图按弱脉冲干扰试井结果对断层进行了调整,L15-17井与L15-18井、L15-19井间的断层已不存在。对该区块重新进行地质研究,认为整个区块内部无断层存在,为一整装构造油藏。

结 论

1. 在低渗透区块,测试设计时,对于井间距离远

的井开关井时间间隔要长;且在干扰之前,应关井恢复足够时间,以确保获得明显的干扰信号。

2. 在弱干扰测试中,为取全取准数据,要使用高精度电子压力计;测试期间,要注意观察邻井,尽量保持邻井稳定,使干扰信号只来自于干扰井,确保资料的准确性。

3. 通过此次测试可以看出,脉冲干扰测试技术在注水开发油藏可以全面推广应用,而且激动间隔时间还可以继续缩短,这对实际生产具有积极意义。

4. 目前,在早期数据处理上还存在一些问题。因此,对注水井早期资料的研究还须深入进行。

参 考 文 献

1. 《试井手册》编写组:试井手册(下),石油工业出版社(北京),1992。
2. 刘能强:实用现代试井分析方法,石油工业出版社(北京),1992。

本文收稿日期:2003-03-10 编辑:王 军

用 PT 单封隔器验证 B9-9 井套管漏失的方法

长庆油田 B9-9 井套管结构为: $\phi 273.05 \text{ mm} \times 652.23 \text{ m} + \phi 177.8 \text{ mm} \times 3303.34 \text{ m}$,套管分级接箍位置:1897.64~1898.55 m。2002年9月5~6日,用PT单封隔器验证B9-9井套管漏失。用 $\phi 148 \text{ mm}$ 通井规通至3287.45 m,7日进行井筒试压,用700型向井筒注入25 MPa压力,30 min降至16 MPa,第二次再注入25 MPa,40 min降至15.5 MPa。8日再次井筒试压25 MPa,30 min降至16 MPa,综合分析认为该井可能漏失点有两处:①表层套管可能由于固井质量有问题存在漏失;②套管分级接箍处可能由于固井质量有问题存在漏失。决定对井筒500 m、1885~1900 m进行验证。

现场采用的验钻具为: $\phi 73.02 \text{ mm}$ 油管1根+ $\phi 177.8 \text{ mm}$ PT封隔器+ $\phi 73.02 \text{ mm}$ 油管,具体方法如下:

(1) 首先将钻具下至500 m左右,把井口与油管丝扣上紧,然后上提井口至适当方余,右旋管柱2~3圈,座封封隔器。座封位置为503.36 m,从套管打入25 MPa压力,同时井口油放处敞开,试压30 min,压力未降,油放处无液体流出(证明封隔器坐封牢靠),由此证明井筒505.36 m至井口无漏失。

(2) 卸掉井口,上提解封PT封隔器,继续下钻至1885 m左右,采用同样方法证明井筒1887.76 m至井口无漏失。

(3) 卸掉井口,上提解封PT封隔器,继续下钻1个立柱,此时坐封位置为1906.96 m,从套管打入24 MPa压力,停泵后,刚开始压力下降比较快,30 min后降至11.5 MPa,然后环空卸掉压力,再从油管打入25 MPa压力,试压30 min,压力未降。因此,证明从1906.96 m至人工井底段套管不漏失,漏失点就在1887.76~1906.96 m段,具体点就是套管分级接箍处。

24日对该井挤封,泵压由28 MPa升至30 MPa,排量100~150 L/min,挤入水泥1.65 m³。27日井筒试压25 MPa,30 min降至24.2 MPa,试压合格。

供稿:长庆油田井下测试试井队 常树发

WELL TESTING (YOUQIJING CESHI)

Vol. 12 No. 3 (Serial No. 77) 2003

Abstracts

· Research of Theory & Method ·

The Mathematic Model of Elect-Heating Well in the Well Bore Temperature Field. 2003(3)12:1 ~ 3*Wang Hong (Institute of Drilling and Production, Liaohe Oilfield)*

Used the theory of heat transfer theory and based on the study of heat transfer mechanism both the transfer processes between the oil in well bore and formation and the temperature change in well bore when the viscous crude outflow from the well bore, the paper has established the mathematic model. It may simulate the different cross-sectional temperature in the well bore of the different production and different water cut, and the power needed by electric heating. Thereby, it can offer scientific bases in terms of production project of electric heating for viscous crude well.

Subject heading: electric heating, well bore, temperature field, mathematical model

Study for the Adjustment of Respective Layer Flow Rate in Injection Well. 2003(3)12:4 ~ 6*Zou Yanhua, Li Yuan, Na Hezhong (Test Technology Service Sub-Company, Daqing Oilfield)*

The paper discusses the principle, procedure and field testing result of a new adjusting method of respective layer flow rate in injection wells. It is thought that this method is simple, scientific and can decrease labor stress, upgrade efficiency and makes sure that the testing successful rate is 100 percentage.

Subject heading: separate layer, water flooding, flow control

Analysis of Inflow Performance Relationships Curves of Producing Well and Determination of the Reasonable Flow Pressure. 2003(3)12:7 ~ 8*Qi Wenxu, Zhang Weiju (Testing Company, Daqing Oilfield)*

In terms of the producing well data by fields' experiments, the paper has drafted the inflow performance curves, analyzed and researched the change rule, and given the methods by determined the reasonable flow pressure of producing well. It can get the conclusion that the reasonable flow pressure of producing well should not be lower than the pressure corresponding to the first inflexion point of the inflow performance curve.

Subject heading: oil well, performance curve, permeability, viscosity, flowing pressure

The Mechanism and Corresponding Father Method of Sucker Rod and Tubing in Polymer Flooding Area. 2003(3)12:9 ~ 11*Hao Jianzhong, Cao Weiye (Gudong Oil Production Factory, Shengli Oilfield)*

In theory, the paper has analyzed the eccentric wear mechanism of sucker rod and tubing in wells which their recovery fluids bear polymer and developed a compound protection measure. The measure includes many factors as following: using sink bar; installing centralize sift, changing the gap between plunger and liner, adjusting heat washing seclude, clearing oil transportation etc. The method is remarkable for integrated protection measures in oilfields.

Subject heading: polymer, oil displacemet, sucker rod, eccentric wear, preventive measure

· Evaluation & Application ·

The Weak Pulse Interference Well Testing and Its Application. 2003(3)12:12 ~ 15*Liu Quanhai, Li Qingfeng, Liu Wei, Deng Junjian (Exploration and Development Department, Jidong Oilfield Sub-Company), Liu Yuewu (Institute of Mechanic, Chinese Academy Sciences)*

In this paper, a new kind of well testing technique named weak pulse interference well testing (it can apply to test variable rates and pressure behavior in production well and injection well, respectively) will be represented. Its strongpoint lie in that it can use very easy, can cause little effect on production well test rate, and also can ensure the correct viable pressure response data. Applying the technology to Liu 15-17 groups in Jidong oilfield, the connect relationship, connect depth and connect permeability between wells was represented. Meanwhile, the reason for the high-water-cut producer was analyzed. Based on the knowledge, the better effect was shown when the adjust measure was used in production-ejection wells.

Subject heading: weak pulse interference well test, technique research, application

The Interpretation Methods of Unconventional Data in Testing. 2003(3)12:16 ~ 18*Liu Jing (Chongqing Petroleum High Special School), Chen Gang (No. 1 Oil Production Factory, Jiangsu Oilfield)*